

КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ДВУХПРОВОДНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КАБЕЛЯ С УЧЕТОМ ВЗАИМНЫХ ВЛИЯНИЙ МЕЖДУ ЕГО ПРОВОДНИКАМИ

Д. А. Маевский¹, Е. Ю. Маевская¹, А. Н. Семенюг², А. А. Савельев¹

¹Одесский национальный политехнический университет

²Инжиниринговая компания «С-Инжиниринг»

Аннотация. Исследована зависимость коэффициента полезного действия двухпроводного электрического кабеля с учетом гальванических и магнитных связей между его проводниками в зависимости от комплекса сопротивления нагрузки. Показано, что независимо от комплексного характера волнового сопротивления кабеля максимальное значение коэффициента полезного действия достигается при чисто активной нагрузке и равенстве активных составляющих сопротивления нагрузки и собственного волнового сопротивления кабеля.

Ключевые слова: линия с распределенными параметрами, двухпроводный кабель, волновое сопротивление, коэффициент полезного действия.

Введение

В настоящее время силовые электрические кабели являются наиболее распространенным средством передачи электрической энергии. Применение кабелей имеет неоспоримые технические и экономические преимущества по сравнению с применением воздушных линий передачи:

- отсутствие необходимости отведения зоны отчуждения для высоковольтных линий в условиях плотной застройки на территории населенных пунктов;

- отсутствие необходимости сноса жилых построек в охранный зоне;

- высокая надежность кабельных линий – на них не влияют погодные факторы, намного реже происходят механические повреждения;

- кабельные линии позволяют существенно снизить потери мощности при передаче электроэнергии (согласно [1], на 30% меньше, чем в воздушных линиях).

Согласно [2], общая протяженность кабельных сетей в современных мегаполисах может достигать нескольких сотен километров. При такой длине кабельную линию необходимо рассматривать как линию с распределенными параметрами. Более того, конструктивное исполнение кабеля в виде трех рядом расположенных протяженных проводников вызывает возникновение взаимных связей между этими проводниками. Эти связи имеют индуктивный и гальванический характер и приводят к существенным искажениям действующих токов и напряжений [3]. Исследованию искажений в связанных кабельных ли-

ниях посвящено довольно большое количество работ, например, [4, 5, 6]. В этих работах довольно подробно исследуются негативные влияния взаимных связей на форму кривых напряжения и тока, а также на качество передаваемой по кабелю электрической энергии.

Однако из теории линий с распределенными параметрами известно, что электрические процессы в них имеют волновой характер [7]: в каждой точке линии ток и напряжение нужно рассматривать как наложение двух волновых процессов. Первый процесс обусловлен так называемой «падающей» волной, которая распространяется вдоль линии по направлению от источника к нагрузке. Второй процесс – это волна, которая отразилась от нагрузки и распространяется в обратном направлении – от нагрузки к источнику. За счет того, что не вся электрическая энергия падающей волны проникает в нагрузку, а ее часть отражается, возникают потери мощности, и коэффициент полезного действия линии снижается. Эти процессы хорошо исследованы для одиночных, не связанных между собой линий без потерь. В частности, в работе [8] подробно рассмотрены вопросы перетекания от источника к нагрузке активной и реактивной мощности. Показано, что максимальное значение коэффициента полезного действия достигается при равенстве сопротивления нагрузки волновому сопротивлению линии.

Однако зависимость коэффициента полезного действия связанной двухпроводной кабельной линии от сопротивления нагрузки фаз в литературе не исследована. Поэтому получение и интерпретация такой зависимости являются актуальной задачей и определяют цель работы.

1. Вторичные параметры связанной двухпроводной линии

Как известно из курса ТОЭ, классическая линия с распределенными параметрами характеризуется четырьмя первичными погонными параметрами: сопротивлением R_0 , индуктивностью L_0 , емкостью C_0 и проводимостью G_0 . Эти параметры характеризуют собственное сопротивление и индуктивность проводов линии, а также емкость и проводимость изоляции между ними. В этом случае электромагнитные процессы в линии характеризуются двумя вторичными параметрами: коэффициентом распространения

$$\gamma = \sqrt{(R_0 + j\omega L_0)(G_0 + j\omega C_0)}$$

и волновым сопротивлением

$$\underline{Z}_B = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{G_0 + j\omega C_0}}.$$

Так как в случае равенства сопротивления нагрузки линии ее волновому сопротивлению отсутствуют отраженные волны напряжения и тока (режим согласованной нагрузки) [9], то коэффициент полезного действия линии максимален.

В случае двухпроводной линии все не так просто. Как показано в [4], такой кабель моделируется линией с распределенными параметрами с двумя проводниками и общим проводом. Аналогом общего провода в кабеле является его проводящий экран. Кроме уже перечисленных первичных, двухпроводная линия имеет ряд дополнительных параметров, учитывающих взаимные магнитные и гальванические влияния между проводниками: M_{11} , C_{11} , G_{11} . Здесь принято, что проводники кабеля симметричны, то есть изготовлены из одного и того же материала одинакового сечения. Тогда, введя, согласно [5], обозначения

$$\underline{Z}_0 = R_0 + j\omega L_0,$$

$$\underline{Z}_1 = j\omega M_{11},$$

$\underline{Y}_0 = (G_0 + G_{11}) + j\omega(C_0 + C_{11})$, $\underline{Y}_1 = G_{11} + j\omega C_{11}$, получим два значения коэффициента распространения:

$$\gamma_1 = \sqrt{(\underline{Z}_0 + \underline{Z}_1)(\underline{Y}_0 - \underline{Y}_1)},$$

$$\gamma_2 = \sqrt{(\underline{Z}_0 - \underline{Z}_1)(\underline{Y}_0 + \underline{Y}_1)}.$$

Эти две постоянные распространения определяют три волновых процесса в проводниках кабеля: собственные падающие и отраженные волны, возникающие в проводнике за счет подключенных к нему источника и нагрузки, а также две пары падающих и отраженных волн, возникающих за счет взаимных влияний на этот провод-

ник двух других проводников кабеля. В соответствии с этим двухпроводный кабель характеризуется двумя волновыми сопротивлениями:

$$\underline{Z}_{B1} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_0 + 2\underline{Z}_1}{\underline{Y}_0 - 2\underline{Y}_1}},$$

$$\underline{Z}_{B2} = \underline{Z}_{B3} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_0 - \underline{Z}_1}{\underline{Y}_0 + \underline{Y}_1}}.$$

Как и в случае постоянных распространения, мы можем предположить, что волновое сопротивление \underline{Z}_{B1} описывает волновые свойства собственно данного проводника кабеля, а появление \underline{Z}_{B2} вызвано взаимными влияниями соседних проводников. В дальнейшем сопротивление \underline{Z}_{B1} будем называть собственным волновым сопротивлением проводника.

Появление двух дополнительных волновых сопротивлений закономерно ставит вопрос о том, а что такое режим согласованной нагрузки для трехфазного кабеля и при каком нагрузочном сопротивлении коэффициент полезного действия кабеля будет максимальным. Для ответа на этот вопрос выполнены расчеты зависимости коэффициента полезного действия от нагрузочного сопротивления.

2. Зависимость коэффициента полезного действия от сопротивления нагрузки

Для расчета зависимости коэффициента полезного действия от сопротивления нагрузки были использованы выражения, полученные авторами в работах [4] и [5]:

$$\dot{U}_1(x) = \frac{1}{2} \left[\begin{aligned} & \frac{\dot{U}_{11} + \dot{U}_{21}}{\underline{Z}_{B1}} \frac{\text{sh}\gamma_1(l-x) + \frac{\underline{Z}_H}{\underline{Z}_{B1}} \text{ch}\gamma_1(l-x)}{\text{sh}\gamma_1 l + \frac{\underline{Z}_H}{\underline{Z}_{B1}} \text{ch}\gamma_1 l} + \\ & \frac{\dot{U}_{11} - \dot{U}_{21}}{\underline{Z}_{B2}} \frac{\text{sh}\gamma_2(l-x) + \frac{\underline{Z}_H}{\underline{Z}_{B2}} \text{ch}\gamma_2(l-x)}{\text{sh}\gamma_2 l + \frac{\underline{Z}_H}{\underline{Z}_{B2}} \text{ch}\gamma_2 l} \end{aligned} \right]$$

$$\dot{i}_1(x) = \frac{1}{2} \left[\begin{aligned} & \frac{\dot{U}_{11} + \dot{U}_{21}}{\underline{Z}_{B1}} \frac{\text{ch}\gamma_1(l-x) + \frac{\underline{Z}_H}{\underline{Z}_{B1}} \text{sh}\gamma_1(l-x)}{\text{sh}\gamma_1 l + \frac{\underline{Z}_H}{\underline{Z}_{B1}} \text{ch}\gamma_1 l} - \\ & \frac{\dot{U}_{11} - \dot{U}_{21}}{\underline{Z}_{B2}} \frac{\text{ch}\gamma_2(l-x) + \frac{\underline{Z}_H}{\underline{Z}_{B2}} \text{sh}\gamma_2(l-x)}{\text{sh}\gamma_2 l + \frac{\underline{Z}_H}{\underline{Z}_{B2}} \text{ch}\gamma_2 l} \end{aligned} \right]$$

По этим выражениям рассчитывались комплекс тока в начале первого проводника кабеля

(при $x = 0$) и комплексы тока и напряжения в конце первого проводника кабеля (при $x = l$).

Расчеты производились для двухпроводной линии с такими первичными параметрами: $R_0 = 1,66 \Omega/\text{km}$, $L_0 = 0,395 \text{ мН}/\text{km}$, $C_0 = 0,182 \mu\text{F}/\text{km}$, $M_{11} = 0,29 \text{ мН}/\text{km}$, $C_{11} = 0,182 \mu\text{F}/\text{km}$. Изоляция кабеля принята идеальной, то есть $G_0 = G_{11} = 0$. Для указанных первичных параметров рассчитанные вторичные имеют следующие значения: $\underline{Z}_{B1} = 128,5 - j112,4$, $\underline{Z}_{B2} = 60,26 - j59,08$.

Считалось, что на вход первого проводника линии подключен источник напряжения с действующим значением 380 В и начальной фазой $\psi_1 = 0^\circ$. Ко второму подключен источник с таким же напряжением и начальной фазой $\psi_1 = -120^\circ$.

Для определения коэффициента полезного действия (к. п. д.) η рассчитывались активные мощности P_1 на входе и P_2 на выходе проводника фазы А кабеля, а η определялся по известной формуле как

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\% .$$

Активная и реактивная составляющие сопротивления симметричной нагрузки менялись в пределах от 0 до 250 Ом с шагом 10 Ом. Таким образом было получено 625 значений коэффициента полезного действия кабельной линии. По этим значениям построен график, показанный на рис. 1.

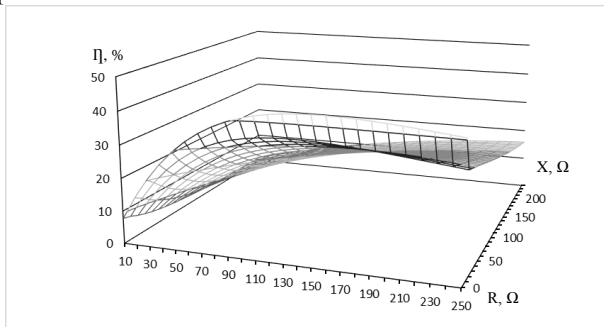
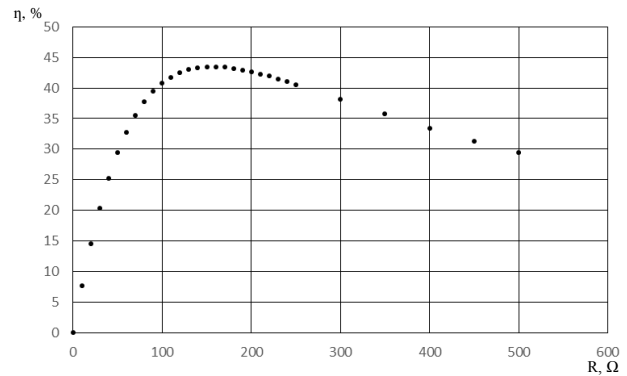


Рис. 1. Зависимость к. п. д. от активного и реактивного сопротивления нагрузки

При анализе этого графика можно обратить внимание на следующие особенности.

Во-первых, как и ожидалось, коэффициент полезного действия всегда остается наибольшим при чисто активной нагрузке. Однако при такой нагрузке его значение имеет нечетко выраженный оптимум (рис. 2). Для наглядности на рисунке 2 показаны значения к. п. д. при изменении сопротивления чисто активной нагрузки.

Во-вторых, значение второго волнового сопротивления не оказывает никакого влияния на ход этого графика.



В-третьих, на ход кривой к. п. д. влияет реактивная составляющая сопротивления нагрузки. Из рис. 1 можно заметить, что с ростом чисто активной нагрузки на участке после 160 Ом к. п. д. снижается.

Рис. 2. Изменение к. п. д. при активной нагрузке

В это же время для нагрузки с реактивным сопротивлением 250 Ом на этом же участке происходит увеличение к. п. д. Можно предположить, что при больших значениях реактивной составляющей сопротивления максимум к. п. д. будет достигаться, соответственно, при больших значениях активной.

Для проверки этой гипотезы на рис. 3 представлена зависимость к. п. д. от активной составляющей сопротивления нагрузки при значении реактивной -250Ω . На рисунке четко видно, что максимальное значение к. п. д. в этом случае достигается при значительно больших активных составляющих сопротивления. Таким образом, с ростом реактивной составляющей максимум к. п. д. будет достигаться при больших значениях активной.

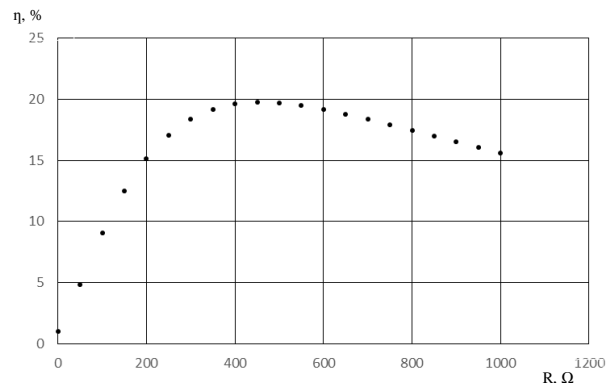


Рис. 3. Зависимость к. п. д. при реактивной составляющей нагрузки -250Ω

Для сравнения интересно проследить, как меняется к. п. д. одиночной, не связанной с другими, линии передачи электрической энергии. Для этого были проведены те же расчеты, но при нулевых значениях M_{11} и C_{11} . В этом случае волновое сопротивление линии равно $\underline{Z}_{B1} = 125 - j116$.

Результаты этих расчетов графически представлены на рис. 4.

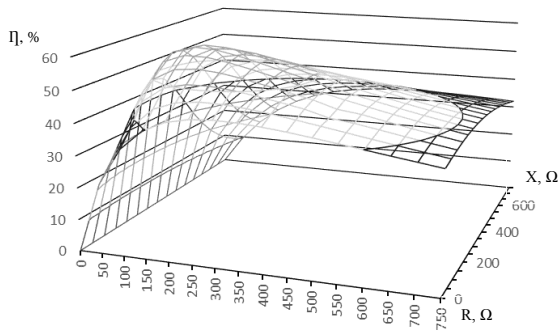


Рис. 4. Зависимость к. п. д. от сопротивления нагрузки для одиночной линии

Из рис. 4 видно, что в одиночной линии, то есть в классической линии с распределенными параметрами, достигается четко выраженный максимум к. п. д. при $R_n = 150 \Omega$ и $X_n = 250 \Omega$.

Выводы

Таким образом, из проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

1. Наличие магнитных и гальванических связей между проводниками линии сглаживает зависимость ее к. п. д. от сопротивления нагрузки. В этом плане можно утверждать, что такие связи оказывают благотворное влияние: при их наличии высокие значения к. п. д. имеют место в большем диапазоне активных и реактивных нагрузок.

2. В связанной линии максимум к. п. д. достигается при сопротивлениях нагрузки, больших по значению, чем активная и реактивная составляющие волнового сопротивления. Это можно объяснить тем, что при изменении сопротивления нагрузки изменяется и выходное сопротивление линии. Это сопротивление в случае наличия потерь в линии (присутствует R_0) уже не равно волновому даже при чисто активной нагрузке. А максимум к. п. д., как известно, достигается при равенстве нагрузочного и выходного сопротивлений.

3. Появление связей между проводниками приводит к появлению дополнительного волнового сопротивления. Однако это сопротивление не оказывает никакого влияния на к. п. д. линии. Поэтому при расчетах оптимальных режимов передачи электрической энергии это дополнительное волновое сопротивление можно не учитывать.

Предметом дальнейших исследований могут стать подобные расчеты в случае симметричных

и несимметричных режимов трехфазного кабеля, все проводники которого имеют между собой магнитные и гальванические связи.

Список использованной литературы

1. Wong, K. Prioritization of underground transmission cable renewal projects in power electric utility companies [Text] / K. Wong // IEEE 27th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. – Toronto, 2014. – P. 1–5.

2. Zuochun, Z. Fault reason analysis of 10kV cable lines of city power grid with OWTS state detection [Text] / Zhou Zuochun, Zhang Yanyan, Li Huachun // China International Conference on Electricity Distribution. – Shanghai, 2012. – P. 1–8

3. Ibbotson, L. The Fundamentals of Signal Transmission Inline, waveguide, fiber and free Space [Text] / L. Ibbotson. – Burlington: Elsevier, 1999. – 150 p.

4. Маевский, Д. А. Влияние взаимных связей между проводниками кабеля на режим работы электрических сетей [Текст] / Д. А. Маевский, А. Н. Семенюг, Г. Н. Кучеренко // Электротехнические и компьютерные системы. – № 19 (95). – К. : Техніка, 2015. – С. 142–145.

5. Маевский, Д. А. Математическое моделирование электромагнитных процессов в экранированных кабелях [Текст] / Д. А. Маевский, А. Н. Семенюг, Е. Ю. Маевская, Г. Н. Кучеренко. // Математичне та імітаційне моделювання систем. МОДС 2015: тези доповідей Десятої міжнародної науково-практичної конференції (Чернівці, 22–26 червня 2015 р.). – Чернівці : ЧНТУ, 2015. – С. 183–187.

6. Sobral, S. T. Transmission lines using aluminium cable steel reinforced ground wires nearby power substations [Text] / S. T. Sobral, C. A. O. Peixoto, J. Amon, F. D. S. Rezende, A. A. Menezes // 2010 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America (T&D-LA). – San Paulo, 2010. – p.p. 57–64.

7. Римский, В. К. Волновые явления в неоднородных линиях. Том 1. Теория распространения волн потенциала и тока. [Текст] / В. К. Римский, В. П. Берзан, М. С. Тыршу; под ред. В. К. Римского. – Кишинев : АН Республики Молдова, 1997. – 295 с.

8. Берзан, В. П. Реактивная мощность в длинных электрических линиях [Текст] / В. П. Берзан, В. К. Римский, В. И. Пацюк, М. С. Тыршу // Problemele Energeticii Regionale. – 2014. – № 3(26). – С. 1–14.

9. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учебник. [Текст] / Л. А. Бессонов. – 11-е издание, перера-

ботанное и дополненное. – М.: Гардарики, 2007. – 701 с.

References

1. Wong, K. (2014) "Prioritization of underground transmission cable renewal projects in power electric utility companies" In: *IEEE 27th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*. Toronto, pp. 1–5.
2. Zuochun, Z., Yanyan, Z., Huachun L. (2012), "Fault reason analysis of 10kV cable lines of city power grid with OWTS state detection" In: *China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*, Shanghai, pp. 1–8
3. Ibbotson, L. (1999) "The Fundamentals of Signal Transmission Inline, waveguide, fiber and free Space", Burlington: Elsevier, 150 p.
4. Maevsky, D. A., Semenuyg, A. N., Kucherenko, G. N. (2015) Influence of the coupling between the cables conductors on the operation mode of electric networks ["Vliyanie vzaimnyih svyazey mezhdru provodnikami kabelya na rezhim raboty elektricheskikh setey"] *Electrotechnic and computer systems*, № 19 (95), pp. 142–145.
5. Maevsky, D. A., Semenuyg, A. N., Maevskaya E. J., Kucherenko, G. N. (2015) "Mathematical modeling of electromagnetic processes in shielded cables" ["Matematicheskoe modelirovanie elektromagnitnykh protsessov v ekranirovannykh kabelyakh"] In: *Mathematical and imitational modeling of systems (MODS)*, Chernihiv, pp. 183–187.
6. Sobral, S. T., Peixoto, C. A. O., Amon, J., Rezende, F. D. S., Menezes, A. A. (2010) "Transmission lines using aluminium cable steel reinforced ground wires nearby power substations" In: *2010 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America (T&D-LA)*, San Paulo, p.p. 57–64,
7. Rimsky, V. K., Berzan, V. P., Tyrshu, M. S. (1997) "Wave phenomena in inhomogeneous lines. Volume 1. The theory of wave propagation potential and current" ["Volnovyye yavleniya v neodnorodnykh liniyakh. Tom 1. Teoriya rasprostraneniya voln potentsiala i toka"], Chisinau: Academy of Sciences of the Republic of Moldova.
8. Berzan, V. P., Rimsky, V. K., Patsuk, V. I., Tyrshu, M. S. (2014) Reactive power in the long electrical lines ["Reaktivnaya moschnost v dlinnykh elektricheskikh liniyakh"] In: *Problemele Energeticii Regionale*, No. 3(26), pp. 1–14.
9. Bessonov, L. A. (2007) "Theoretical Foundations of Electrical Engineering. Electrical circuits: a textbook" ["Teoreticheskie osnovy elektrotehniki. Elektricheskije tsepi: uchebnyk"]. 11-th ed., Moscow: Gardariki.

EFFICIENCY OF TWO-WIRE ELECTRIC CABLES IN VIEW OF MUTUAL INFLUENCE BETWEEN ITS WIRING

D. A. Maevsky¹, E. J. Maevskaya¹, A. N. Semenyug², A. Savelev¹

¹Odessa National Polytechnic University

²Engineering company "S-engineering"

Abstract. Now wave processes in lines with the distributed parameters are considered well studied. Particularly it is known that the maximum value of efficiency of the line without loss reaches in so-called mode of approved loading when loading resistance is equal to wave resistance of the line. However, all two-wire and three-wire cables of communication represent system of lines with distributed parameters in which separate conductors are connected with each other by magnetic and galvanic communications. In such cables dependence of coefficient of useful action from loading resistance remains not researched. In this article, on the basis of mathematical model formed by authors, it is comprehensively investigated that influence of active and reactive components of loading resistance on efficiency of the cable having two conductors with general screen. It is shown that with communications the efficiency is influenced by both components of loading resistance. The maximum value of efficiency is reached in case of net active loading, however its increase is also possible in case of reactive resistance. At the same time it is shown that the efficiency is influenced only by balance between own wave resistance and loading resistance of connected lines system. The secondary wave resistance caused by an interconnection doesn't influence on efficiency. It is found that connected lines system has smaller sensitivity for changing of loading resistance in comparison with the line without communications. This fact shows that practical application of the connected lines transmission of electrical energy allows providing high values of efficiency in wide spectrum of changing of loading resistance.

Key words: line with distributed parameters, two-wire cable, wave impedance, efficiency.

КОЕФІЦІЄНТ КОРИСНОЇ ДІЇ ДВОПРОВОДНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО КАБЕЛЮ ІЗ ВРАХУВАННЯМ ВЗАЄМНИХ ВПЛИВІВ МІЖ ЙОГО ПРОВІДНИКАМИ

Д. А. Маєвський¹, О. Ю. Маєвська¹, О. М. Семенюг², А. А. Савельєв¹

¹Одеський національний політехнічний університет

²Інжинірингова компанія «С-Інжиніринг»

Анотація. Досліджено залежність коефіцієнта корисної дії двопроводного електричного кабелю з урахуванням гальванічних і магнітних зв'язків між його провідниками залежно від комплексу опору навантаження. Показано, що незалежно від комплексного характеру хвильового опору кабелю максимальне значення коефіцієнта корисної дії досягається при чисто активному навантаженні та рівності активних складових опору навантаження і власного хвильового опору кабелю.

Ключові слова: лінія з розподіленими параметрами, двопровідний кабель, хвильовий опір, коефіцієнт корисної дії.

Получено 00.02.2017



Маевский Дмитрий Андреевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретических основ и общей электротехники Одесского национального политехнического университета. Просп. Шевченко, 1, Одесса, Украина, E-mail: Dmitry.A.Maevsky@gmail.com, тел. +38-048-705-84-54

Dmitry Maevsky, Dr. of Science, Professor, Head of the Department of theoretical foundations and general electrical engineering, Odessa National Polytechnic University, Shevchenko ave., 1, Odessa, Ukraine

ORCID ID: 0000-0003-0666-6199



Маевская Елена Юрьевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теоретических основ и общей электротехники Одесского национального политехнического университета. Просп. Шевченко, 1, Одесса, Украина, E-mail: E.J.Maevskaya@gmail.com, тел. +38-048-705-84-54

Elena Maevskaya, PhD, Ass. Professor, Ass. Professor of the Department of theoretical foundations and general electrical engineering, Odessa National Polytechnic University, Shevchenko ave., 1, Odessa, Ukraine

ORCID ID: 0000-0001-6297-4255



Семенюг Александр Николаевич, зам. генерального директора по науке ООО «С-инжиниринг». ул. Н. Боровского, 28, корп. 47, Одесса, Украина, E-mail: Aleksander.semenyug@se.ua, тел. +38-048-730-57-31

Aleksandr Semenyug, Deputy CEO for Science, S-engineering LLC, 28 Nickolaya Borovskogo Str., block 47, city of Odessa, Ukraine

ORCID ID: 0000-0003-1198-2014



Савельев Артем Андреевич, бакалавр, студент магистратуры кафедры электрооборудования и энергетического менеджмента Одесского национального политехнического университета, Просп. Шевченко, 1, Одесса, Украина, E-mail: saveart458@gmail.com, тел. +38-095-416-70-98

Artem Savieliev, bachelor, Master student of department of theoretical foundations and general electrical engineering, Odessa National Polytechnic University, Shevchenko ave., 1, Odessa, Ukraine

ORCID ID: 0000-0002-6949-5959